

بررسی ارتباط بین شاخص‌های نظریه آشوب در رفتارنگاری جریان رودخانه‌ای در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت

مهسا بوستانی^۱، حجت کرمی^{۲*}، سید فرهاد موسوی^۳، سعید فرزین^۴

مقاله پژوهشی برگرفته از پایان نامه کارشناسی ارشد

تاریخ ارسال: ۱۳۹۶/۱۰/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۳/۲۷

چکیده

در پژوهش حاضر، تأثیر تغییرات مقیاس زمانی بر آشوبناکی و دامنه آشوبناکی دبی جریان ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست مخزن سد زاینده‌رود، روند تغییرات بُعد همبستگی جریان و افق پیش‌بینی، طی ۴۳ سال (۹۲-۱۳۵۰) مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. همچنین، ارتباط بین بُعد همبستگی و افق پیش‌بینی در گذر زمان مشخص شده است. بدین منظور، دبی ایستگاه‌های هیدرومتری اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله در چهار مقیاس زمانی روزانه، ۳، ۵ و ۷ روزه به کار برده شده است. به عنوان گام نخست، زمان تأخیر و بُعد محاط سیستم از روش میانگین اطلاعات متقابل و نزدیکترین همسایگان کاذب محاسبه گردیده است. سپس، بُعد فرکتالی سیستم با استفاده از روش بُعد همبستگی تخمین زده شده است. در ادامه، با استفاده از شاخص نمای لیاپانوف، افق پیش‌بینی در سری‌های آشوبناک برآورد گردیده است. نتایج حاکی از آن است که دبی جریان در مقیاس ۵ روزه در ایستگاه پل زمانخان و ۷ روزه در ایستگاه‌های پل زمانخان و اسکندری، رفتار تصادفی دارد و در بقیه مقیاس‌ها، آشوبناک می‌باشد. ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ و پل زمانخان در تمام مقیاس‌های آشوبناک، دارای آشوب کم دامنه هستند. در ایستگاه پل کله، دبی جریان در مقیاس روزانه دارای آشوبناکی کم بوده و در مقیاس‌های ۳، ۵ و ۷ روزه دارای آشوب با دامنه متوسط است. نتایج دیگر نشان‌دهنده آن است که با افزایش مقیاس زمانی، بُعد همبستگی افزایش و افق پیش‌بینی کاهش می‌یابد. از سوی دیگر، با توجه به نمای لیاپانوف، ایستگاه‌های بالادست دریاچه زاینده‌رود در تمام مقیاس‌ها نسبت به ایستگاه‌های پایین‌دست از افق پیش‌بینی بیشتری برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: رفتارنگاری جریان، نظریه آشوب، مقیاس زمانی، دامنه آشوبناکی، افق پیش‌بینی

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. mahsaboutani@semnan.ac.ir

^۲ استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

*نویسنده مسئول hkarami@semnan.ac.ir

^۳ استاد، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. fmousavi@semnan.ac.ir

^۴ استادیار، گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران. saeed.farzin@semnan.ac.ir

مقدمه

فرایندهای هیدرولوژیک در دامنه وسیعی از زمان و مکان اتفاق می‌افتند. به علت تغییرات آب و هوا، این فرایندها می‌توانند تغییرات وسیعی در تمامی مقیاس‌ها داشته باشند. در گذشته، فرض بر این بوده که جریان رودخانه در مقیاس‌های زمانی متفاوت، رفتاری یکسان و تصادفی از خود نشان می‌دهد (شقایق‌یان و بیدختی، ۱۳۸۸). در دهه‌های اخیر، مدل‌سازی، تحلیل و پیش‌بینی سری‌های زمانی مربوط به علوم هیدرولوژی و منابع آب، توجه محققین را جلب کرده است. در این میان، رفتارنگاری و مطالعه مقدار دبی رودخانه‌ها در حوزه‌های آبخیز از اهمیت خاصی برخوردار است؛ چرا که کمبود دبی منجر به وقوع رویدادهای نامطلوبی، از جمله خشکسالی، می‌گردد و مازاد آن به صورت سیلاب باعث خسارات جانی و مالی می‌شود. بنابراین، تحلیل مناسب جریان به منظور ساماندهی رودخانه، طراحی و برنامه‌ریزی منابع آب سطحی و سامانه‌های هشدار سیل امری ضروری می‌باشد (Sivakumar, 2009).

جریان رودخانه، به عنوان یک سیستم طبیعی پیچیده می‌تواند با استفاده از مکانیزم‌های غیرخطی مختلف و در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوت، مدل‌سازی شود. داشتن اطلاعات کافی از ماهیت غیرخطی سیستم رودخانه کمک شایانی در انتخاب نوع مدل‌های مناسب ریاضیاتی خواهد کرد (Wang et al., 2006; Sivakumar, 2009). روش‌های تحلیل سری‌های زمانی را می‌توان در دو دسته روش‌های آماری و روش‌های محاسبات نرم قرار داد (Wang et al., 2015). از جمله مدل‌های آماری، مدل‌های خودهمبسته^۱، خودهمبسته با میانگین متحرک^۲ و آریما^۳ می‌باشند (Valipour, 2015). از مدل‌های محاسبات نرم نیز می‌توان به شبکه‌های عصبی مصنوعی^۴، سامانه استنتاج فازی^۵ مبتنی بر شبکه تطبیقی و نظریه آشوب^۶ اشاره کرد. ماهیت روش‌های آماری به‌گونه‌ای است که در محیط‌های با تغییرات کم به خوبی قادر به پیش‌بینی هستند. اما در محیط‌های دارای اغتشاش نمی‌توانند تقریب خوبی از تغییرات محیطی

را تخمین بزنند. روش‌های سنتی پیش‌بینی، مانند روش ARIMA، بر این فرض استوارند که سری‌های زمانی مبتنی بر فرایندهای خطی هستند؛ در حالی که سیستم‌های طبیعی عمدتاً غیرخطی هستند (امیرخان و همکاران، ۱۳۹۴). مدل‌های بر مبنای شبکه عصبی توانایی انعکاس و در نظر گرفتن رفتار استوکاستیک متغیرهای هیدرولوژیک را ندارند و اغلب در پیش‌بینی‌های نقطه‌ای به کار می‌روند و نمی‌توانند عدم قطعیت پیش‌بینی را در خروجی منعکس کنند (پوستی‌زاده و نجفی، ۱۳۹۰). امروزه، روش‌های مبتنی بر نظریه آشوب ابزار کارآمدی برای مدل‌سازی سیستم‌های غیرخطی و پیچیده می‌باشند. نظم در بی‌نظمی، پایه نظریه آشوب می‌باشد. پدیده‌های طبیعی بی‌شماری وجود دارند که عملکرد آنها در یک مقیاس زمانی، تصادفی و بی‌نظم به نظر می‌رسد. اما با تغییر مقیاس می‌توانند به نوعی نظم دست یابند و امکان پیش‌بینی آنها در آینده نیز فراهم گردد. (Hassanzadeh et al., 2013). این روش از مزایای متعددی برخوردار است، از جمله، عدم نیاز به اطلاعات درباره متغیرهای داخلی سیستم و ارائه راه حل ساده‌تر جهت تحلیل مسائل چندمتغیره. از سوی دیگر، به دلیل تک‌متغیره بودن، مشکلاتی که در برآورد پارامترهای مدل‌های چندمتغیره مطرح است در این روش وجود ندارد.

در یک سیستم قطعی، با داشتن اطلاعات سیستم در زمان گذشته، می‌توان مسیر آینده را پیش‌بینی کرد. زیرا وضعیت فعلی سیستم به وضعیت قبلی آن وابسته است. در سیستم تصادفی، حتی برای یک مدت زمان کوتاه هم نمی‌توان پیش‌بینی داشت. چرا که وضعیت فعلی سیستم از وضعیت پیشین آن مستقل است. اما در پدیده‌های آشوبی، امکان پیش‌بینی رفتار سیستم در بازه زمانی کوتاه وجود دارد.

با توجه به اهمیت موضوع، تاکنون تحقیقات چندی توسط پژوهشگران انجام شده است که اهم آنها به شرح زیر می‌باشد. رگوندا و همکاران (۲۰۰۴) داده‌های جریان سه رودخانه در مقیاس‌های زمانی روزانه، ۵ روزه و ۷ روزه را از

⁴ ANN

⁵ ANFIS

⁶ Chaos Theory

¹ Autoregressive

² ARMA

³ ARIMA



همبستگی و نمای لیاپانوف، بررسی نمود. وی بیان نمود که جریان در مقیاس روزانه، آشوبی است. اما در مقیاس‌های ماهانه و فصلی از روندی تصادفی پیروی می‌کند. از سوابق تحقیقات پیشین می‌توان چنین بیان نمود که تاکنون مطالعات اندکی روی روند تغییرات جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف انجام شده است. هدف از تحقیق حاضر، بررسی و تحلیل تأثیر تغییرات مقیاس زمانی بر میزان آشوبناکی دبی جریان در ایستگاه‌های بالادست و پایین‌دست مخزن سد زاینده‌رود (به عنوان مطالعه موردی) و همچنین بر مقادیر بُعد همبستگی جریان می‌باشد. بدین منظور، داده‌های جریان در ایستگاه‌های بالادست مخزن سد زاینده‌رود شامل ایستگاه‌های اسکندری و قلعه شاهرخ و پایین‌دست شامل ایستگاه‌های پل کله و پل زمانخان طی سال‌های ۱۳۵۰ تا ۱۳۹۲ مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه، با استفاده از شاخص نمای لیاپانوف، افق پیش‌بینی در سری‌های زمانی آشوبناک محاسبه گردیده است. سپس، ارتباط بین بُعد همبستگی و افق پیش‌بینی در گذر زمان تحلیل شده است.

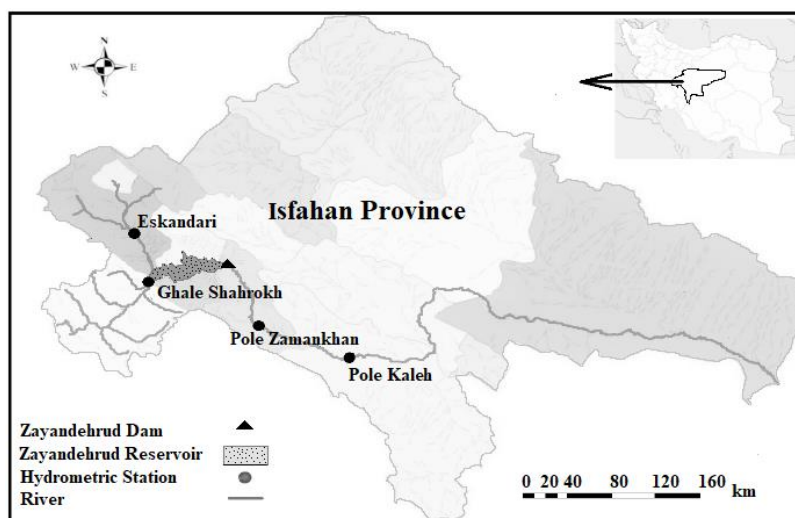
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

رودخانه زاینده‌رود به عنوان بزرگ‌ترین رودخانه دایمی آب شیرین در منطقه مرکزی ایران مطرح می‌باشد. این رودخانه از شمالی‌ترین بخش حوضه آبریز زاینده‌رود سرچشمه گرفته و در مسیری از شمال غرب به سمت جنوب شرق و پس از طی مسافتی حدود ۳۵۰ کیلومتر به باتلاق گاوخونی می‌ریزد. این حوضه در بین طول‌های جغرافیایی $31^{\circ}15'$ و $50^{\circ}21'$ و $53^{\circ}20'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}45'$ شمالی واقع شده است. در طول مسیر رودخانه، ایستگاه‌های اسکندری و قلعه شاهرخ در بالادست و در ادامه پل زمانخان و پل کله در پایین‌دست قرار دارند. موقعیت جغرافیایی حوضه زاینده‌رود و ایستگاه‌های مورد نظر در شکل ۱ و ویژگی‌های آماری داده‌های مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

نظر آشوب‌پذیری بررسی نمودند. تعدادی از سری داده‌ها رفتار آشوبناک و برخی رفتار تصادفی نشان دادند. وانگ و همکاران (۲۰۰۶) با بررسی جریان ۴ رودخانه در مقیاس‌های زمانی روزانه، ۱۰ روزه، ماهانه و سالانه نشان دادند که داده‌ها با مقیاس زمانی کوچک در مقایسه با داده‌ها با مقیاس زمانی بزرگ، دارای مکانیزم پیچیده‌تری هستند. هرچه مقیاس زمانی کوچکتر می‌شود، شدت غیرخطی بودن افزایش می‌یابد. آنها با وجود اینکه رفتار غیرخطی با شدت‌های مختلف را در مقیاس‌های زمانی متفاوت مشاهده کردند، اما انطباق دینامیک فرایند با آشوب کم بعد را رد نمودند. ژانگ و همکاران (۲۰۱۳) به بررسی رفتار جریان رودخانه ماناس در آسیای مرکزی در چهار مقیاس زمانی روزانه، ۳، ۷ و ۱۰ روزه پرداختند. نمای لیاپانوف مثبت در مقیاس‌های بررسی شده، نشان از آشوبناکی دبی جریان داشت.

شقایان و طالب بیدختی (۱۳۸۸) به بررسی رفتار جریان رودخانه آنکوپاگر در چهار مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه، ساعتی، روزانه و هفتگی پرداختند. در تحقیق ایشان، برای مقایسه رفتار رود در مقیاس‌های گوناگون تنها از شاخص بُعد همبستگی استفاده شده است. نتایج نشان داد که رفتار جریان در مقیاس زمانی ۱۵ دقیقه‌ای، آشوبناک و در مقیاس هفتگی، تصادفی و در مقیاس میانی، بین این دو می‌باشد. مرادی‌زاده کرمانی (۱۳۸۹) با استفاده از مفاهیم نظریه آشوب به مطالعه رفتار رودخانه ليقوان چای پرداخت. نتایج وی حاکی از آشوبناک بودن رودخانه مذکور در مقیاس‌های زمانی روزانه، ۵ و ۷ روزه بود. جباری قره‌باغ و همکاران (۱۳۹۴) آشوبناکی رودخانه نازلوچای در مقیاس روزانه، هفتگی و ماهانه طی دوره آماری ۲۰ ساله را بررسی کردند. نتایج دلالت بر آشوبناکی جریان رودخانه مذکور در هر سه مقیاس زمانی داشت. ادب و همکاران (۱۳۹۴) به تحلیل آشوبی جریان روزانه و ماهانه رودخانه گرگر طی ۳۴ سال پرداختند. نتایج حاکی از آشوبناک بودن سری زمانی در مقیاس روزانه و تصادفی بودن در مقیاس ماهانه بود. ادب و همکاران (۱۳۹۵) جریان رودخانه شطیپ را در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و فصلی، با استفاده از شاخص‌های بُعد



شکل (۱): وضع زاینده رود و موقعیت ایستگاه‌های هیدرومتری در آن.

جدول (۱): مشخصات آماری دبی رودخانه زاینده رود طی سال‌های ۱۳۵۰-۱۳۹۲ در ایستگاه‌های مورد مطالعه و مقیاس‌های زمانی مختلف.

Station	Time scale	Number of data	Average (m ³ /s)	Standard deviation (m ³ /s)	Max (m ³ /s)	Min (m ³ /s)	Skew
Eskandari	Daily	15340	4.26	5.90	105	0	4.01
	3-Day	5148	4.29	5.79	64.38	0	3.61
	5-Day	3084	4.28	5.73	60.12	0	3.47
	7-Day	2208	4.28	5.60	59.06	0.001	3.33
Ghale Shahrokh	Daily	15340	39.09	39.72	974	0.4	3.70
	3-Day	5148	38.92	38.30	470	4.55	2.73
	5-Day	3084	38.92	37.78	406.68	4.65	2.51
Pole Zamankhan	7-Day	2208	38.92	36.58	320.97	4.68	2.17
	Daily	15340	43.42	43.58	4080	0.8	53.95
	3-Day	5148	42.81	26.28	266	4	1.43
Pole Kaleh	5-Day	3084	42.81	26.16	261.2	4.08	1.40
	7-Day	2208	42.85	25.56	228.8	4.34	1.32
	Daily	15340	37.96	27.65	318	0.19	1.41
	3-Days	5148	38.08	27.57	291.33	0.37	1.39
	5-Day	3084	38.13	27.42	278.4	0.60	1.36
	7-Day	2208	38.05	26.83	240.88	0.61	1.27

مطالعه از روش میانگین اطلاعات متقابل^۲ مطابق فریزر و سوئینی (۱۹۸۶) استفاده شده است. اطلاعات متقابل بین اندازه $y(t)$ و اندازه $y(t+\tau)$ عبارت است از میزان فراگیری در مورد اندازه‌گیری $y(t+\tau)$ با استفاده از اندازه‌گیری $y(t)$ (لطف‌اللهی یقین و همکاران، ۱۳۹۲). ابتدا باید اطلاعات متقابل را به صورت رابطه (۱) تشکیل داد:

محاسبه زمان تأخیر^۱ بهینه

به فاصله زمانی بین دو مؤلفه در بردارهای تأخیر، زمان تأخیر گفته می‌شود. به عبارت دیگر، زمان تأخیر، حداقل دوره زمانی است که خصوصیات پدیده مورد مطالعه در آن بروز می‌کند و قابل بررسی می‌باشد (Abarbanel, 1996). در این تحقیق، جهت تعیین زمان تأخیر سری زمانی مورد

² AMI

¹ Delay\ lag time

فضای با بُعد بیشتر به فضای با بُعد کمتر صورت گرفته باشد، در این صورت با رفتن از بُعد m به $m+1$ ، این همسایه‌های کاذب از همسایگی بردار $Y_i(t)$ خارج می‌گردند. با افزایش بُعد از m به $m+1$ ، مؤلفه‌های اضافه شده به بردارهای تأخیر $Y_i(t)$ و $Y_r^{NN}(t)$ به ترتیب $y(t-m\tau)$ و $y(t_r-m\tau)$ خواهند بود. بنابراین، فاصله بین دو بردار بر اساس نرم اقلیدسی در فضای $m+1$ بُعدی به طور مشابه به صورت فرمول (۵) محاسبه می‌گردد. فاصله اضافه شده در فضای $m+1$ بُعدی را نسبت به فاصله دو بردار در فضای m بُعدی به صورت رابطه (۶) خواهیم داشت:

$$R_{m+1}^2 = R_m^2 + [y(t-m\tau) - y(t_r-m\tau)]^2 \quad (5)$$

(۶)

$\sqrt{R_{m+1}^2 - R_m^2} = |y(t-m\tau) - y(t_r-m\tau)|$
هرگاه مقدار فوق از حدود ۱۵-۱۰ فراتر برود، همسایه تحت بررسی، کاذب در نظر گرفته می‌شود (پری زنگنه و همکاران، ۱۳۸۷).

تخمین بُعد همبستگی^۳

گراسبرگر و پروکاشیا (۱۹۸۳) الگوریتم بُعد همبستگی را برای جستجوی رفتار آشوبناک پیشنهاد کردند. این الگوریتم، بُعد سیستم مولد داده‌ها را تخمین می‌زند. کار تحلیل سری زمانی، با سری یک بُعدی به صورت $[X_t]_{t=1}^T$ شروع می‌شود که می‌توان آن را با ابعاد $M \times T$ به شکل رابطه (۷) تبدیل کرد:

$$X_t = (x_t, x_{t-1}, \dots, x_{t-m+1}) \quad (7)$$

هر ردیف از ماتریس X_t ، یک بردار m تایی است. اگر $[X_t]_{t=1, \dots, T}$ یک نمونه تصادفی از متغیرهایی باشد که مستقل از یکدیگر و دارای توزیع احتمال یکسان باشند، آنگاه به ازای مقادیر مشخص m و ε رابطه (۸) برقرار است.

$$C_m(\varepsilon) = C_1(\varepsilon)^m$$

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|\{X_i^m - X_j^m\}| \leq \varepsilon}{T^2} = C_m$$

(۱)

به منظور محاسبه میانگین اطلاعات متقابل $I(\tau)$ لازم است که احتمال‌های مجزا $p(y(t))$ و $p(y(t+\tau))$ موجود در رابطه (۱) تخمین زده شوند. سپس، برای محاسبه آنها هیستوگرام مربوط به $y(t)$ و $y(t+\tau)$ در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه احتمال مشترک $p(y(t), y(t+\tau))$ از هیستوگرام بردار $(y(t), y(t+\tau))$ استفاده می‌شود. فریزر و سوئینی (۱۹۸۶) اولین مینیمم تابع میانگین اطلاعات متقابل را به عنوان زمان تأخیر مناسب معرفی کردند.

تخمین بُعد محاط^۱

حداقل بُعد بازسازی لازم، بُعد محاط (نهشتن) است (Ng et al., 2007). روش شمارش نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب، یکی از روش‌های تعیین بُعد محاط است که تعداد نزدیک‌ترین همسایه‌های کاذب به ازای ابعاد مختلف محاسبه می‌شود. هنگامی که همسایه‌ها به حداقل یا صفر برسند آن بُعد به عنوان بُعد محاط در نظر گرفته می‌شود (Islam and Sivakumar, 2002). در این روش، m مؤلفه برای هر بردار تأخیر در نظر گرفته می‌شود. بردارهای تأخیر $Y_i(t)$ در فضای محاط مطابق رابطه (۲) تشکیل می‌شوند:

$$Y_i(t) = [v(t), v(t-\tau), \dots, v(t-(m-1)\tau)]^T \quad (2)$$

r امین همسایه هر بردار تأخیر $Y_i(t)$ به صورت رابطه (۳) می‌باشد:

$$Y_r^{NN}(t) = [y(t), y(t-\tau), \dots, y(t-(m-1)\tau)]^T \quad r=1, 2, n \quad (3)$$

و فاصله بین دو بردار همسایه بر اساس نرم اقلیدسی به فرم رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

(۴)

$R_m^2 = \sum_{(\lambda)}^{m-1} [v(t-i\tau) - v(t_{\lambda}-i\tau)]^2$
اگر بردار $Y_r^{NN}(t)$ یک همسایه واقعی برای بردار $Y_i(t)$ باشد، این همسایگی نشأت گرفته از ماهیت دینامیک سیستم است. ولی اگر این همسایگی در اثر تصویر از یک

³ Correlation dimension

¹ Embedding dimension

² FNN

$$\lambda(x_0) = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \log \left| \frac{f^n(x_0 + \varepsilon) - f^n(x_0)}{\varepsilon} \right| \quad (12)$$

نتایج و بحث

در پژوهش حاضر، به منظور محاسبه شاخص‌های معرفی شده، از نرم افزار Tisean و کد نویسی انجام پذیرفته در Matlab بهره برده شده است. برای محاسبه زمان تأخیر، مطابق روش اطلاعات متقابل و تعیین اولین مینیمم محلی عمل گردید (شکل ۲). با توجه به این شکل، زمان تأخیر ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمان خان و پل کله به ترتیب در مقیاس روزانه برابر ۷۰، ۸۷، ۳۷ و ۸۵، در مقیاس ۳ روزه برابر ۳، ۳، ۵ و ۷، در مقیاس ۵ روزه برابر ۸، ۳، ۵، ۵ و در مقیاس ۷ روزه برابر ۳، ۴، ۹ و ۵ به دست آمده است. به این معنی که اگر مثلاً سری جریان روزانه ایستگاه اسکندری با تأخیر ۷۰ روز از سری زمانی اولیه تشکیل شود می‌توان انتظار داشت که سیستم رفتار آشوبناک خود را حفظ کرده و در قالب جاذب فرکتالی در فضای فاز خود را نشان دهد (Eslami et al., 2016).

در شکل ۳، مقادیر نزدیک‌ترین همسایگی کاذب به ازای مقادیر مختلف بُعد محاط برای ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمان خان و پل کله در مقیاس‌های روزانه، ۳، ۵ و ۷ روزه ترسیم شده است. بُعد محاط ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمان خان و پل کله به ترتیب در مقیاس روزانه برابر ۹، ۱۷، ۱۵ و ۱۰ روز، در مقیاس ۳ روزه برابر ۷، ۱۸، ۶ و ۹ روز، در مقیاس ۵ روزه برابر ۸، ۹ و ۷ روز و در مقیاس ۷ روزه برابر ۶، ۷، ۶ و ۷ روز می‌باشد. به منظور محاسبه بُعد همبستگی جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف، بعد از محاسبه تغییرات $\log C(r)$ در مقابل $\log(r)$ ، نمودار توان همبستگی مطابق شکل ۴ ترسیم شده است. با توجه به این شکل، در صورت اشباع شدن نمودار، رفتار سیستم مورد مطالعه آشوبناک است. بر این اساس، بُعد همبستگی ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمان خان و پل کله محاسبه گردید که نتایج در جدول ۲ ارائه شده است.

که $C_m(\varepsilon)$ همبستگی جمعی یا تعداد نقاط موجود در فضای m است که فاصله‌ای کمتر از مقدار کوچک و معین ε از یکدیگر دارند. اگر سری زمانی از یک فرایند تصادفی نتیجه شده باشد، با افزایش بُعد محاط نقاط موجود در فضای حالت m بُعدی، در تمام جهات پراکنده خواهد شد. ولی اگر سری از فرایند معین نتیجه شده باشد، نقاط به سمت زیر مجموعه‌ای از فضای حالت جذب می‌شوند. بُعد همبستگی طبق رابطه (۹) به دست می‌آید:

$$D^m = \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\text{Log } C_m}{\text{Log } \varepsilon} \quad (9)$$

تعیین افق پیش‌بینی^۱ جریان در مقیاس‌های زمانی مختلف

وابستگی به شرایط اولیه در سیستم‌های آشوبناک سبب کاهش دقت پیش‌بینی در بازه‌های زمانی بلندمدت می‌شود. پیش‌بینی بلندمدت در سیستم آشوبناک، تحت تأثیر احتمالات است. اما رفتار کوتاه‌مدت سیستم غیرخطی آشوبناک می‌تواند با دقت مناسب قابل پیش‌بینی باشد. به منظور مدیریت منابع آب در کشور، تصمیم‌گیری کوتاه‌مدت جهت برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از منابع دارای اهمیت زیادی است. مقدار افق پیش‌بینی (Δt) سری زمانی آشوبناک به صورت رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود:

$$(\Delta t) = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

که در این رابطه، λ بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف^۲ است (Rosenstein et al., 1993). اگر بزرگ‌ترین نمای لیاپانوف محاسبه شده لیاپانوف مقدار مثبتی داشته باشد، سیستم دارای رفتار آشوبی است. در یک سری زمانی، اگر بین X_n و X_{n+1} رابطه تبعی $X_{n+1} = f(X_n)$ وجود داشته باشد، می‌توان فاصله بین X_0 و $X_0 + \varepsilon$ را با ε و فاصله بین $f^n(X_0)$ و $f^n(X_0 + \varepsilon)$ را با تابع نمایی $\varepsilon e^{\lambda n(X_0)}$ به صورت رابطه (۱۱) نشان داد.

$$\varepsilon e^{\lambda n(X_0)} = |f^n(X_0 + \varepsilon) - f^n(X_0)| \quad (11)$$

حد رابطه (۱۱) به صورت رابطه (۱۲) است:

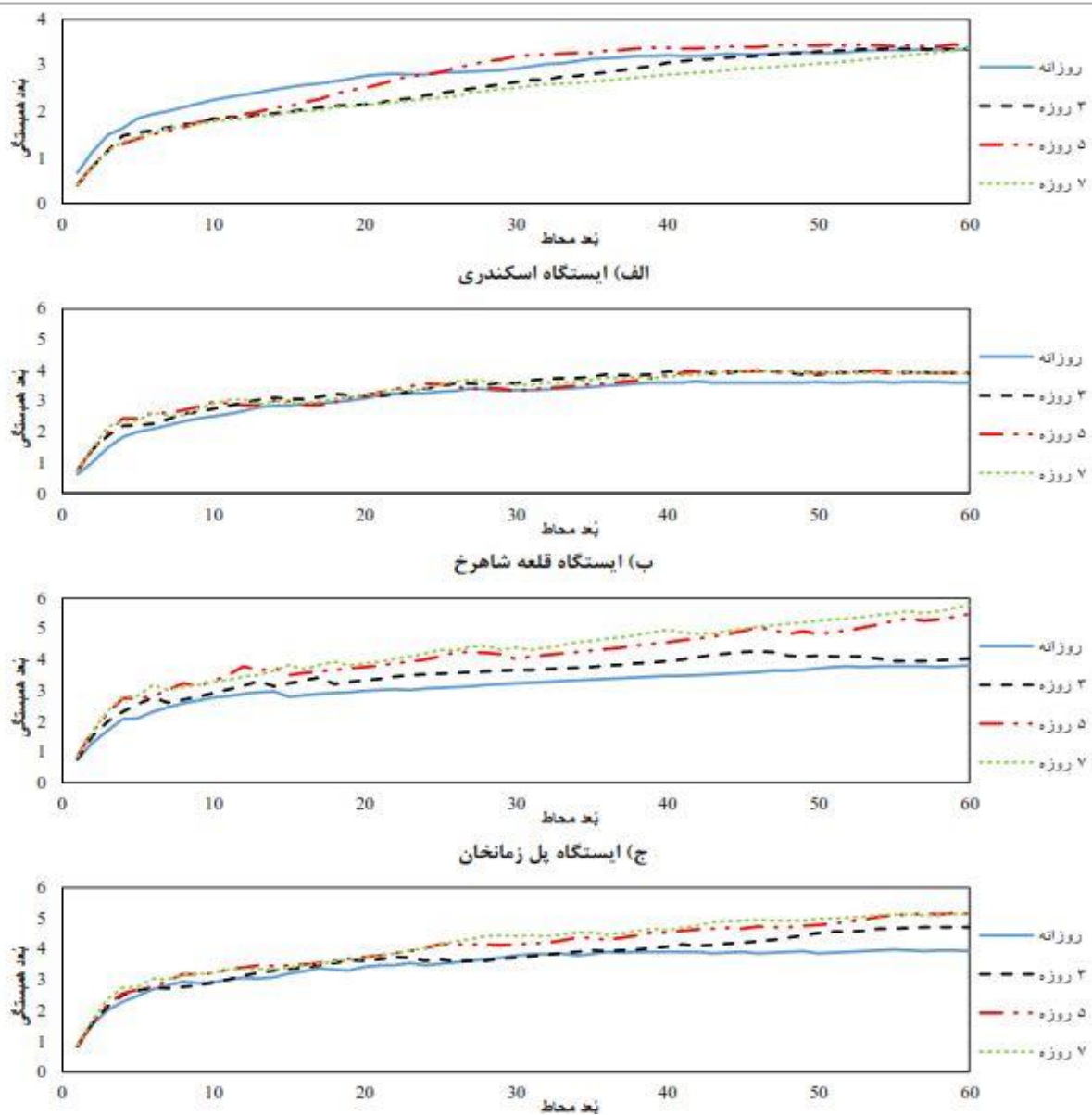
² Lyapunov exponent

¹ Prediction horizon

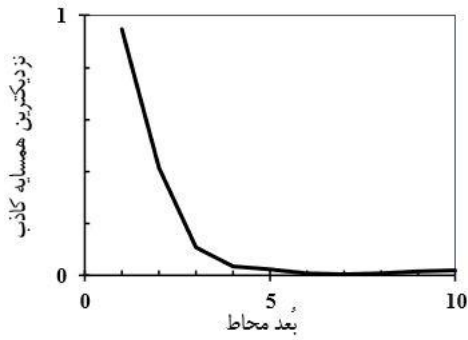


رفته شود، بُعد همبستگی افزایش یافته است. از طرفی، وجود داده صفر در سری زمانی می‌تواند باعث برآورد کمتر بُعد همبستگی و منجر به وجود آشوب گردد (Koutsoyiannis, 2006). به همین دلیل، در قسمت بالادست به علت وجود داده صفر در سری زمانی مورد بررسی و مقدار دبی کم در ایستگاه اسکندری به نسبت ایستگاه‌های پایین‌دست که مقادیر دبی بیشتری دارند، دارای دبی نسبتاً کمتری است. بنابراین، ایستگاه‌های بالادست از تغییرات کمتری برخوردارند. در نتیجه، مقادیر بُعد همبستگی کمتری نسبت به ایستگاه‌های پایین‌دست دارند. بُعد همبستگی بین ۲/۵ و ۴/۵ معرف آشوبناکی کم و بین ۸ و ۱۱ شامل آشوبناکی متوسط تا زیاد است (Sivakumar, 2000).

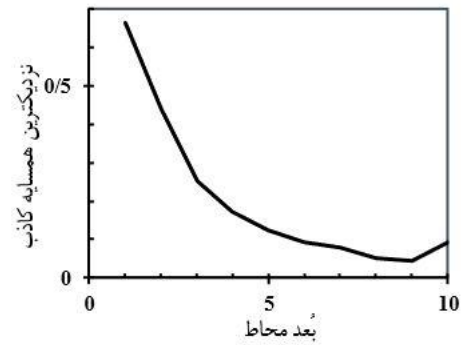
بر اساس شکل ۴، مقادیر توان همبستگی به ازای سری زمانی جریان ۷ روزه در ایستگاه اسکندری با افزایش بُعد محاط زیاد شده و در هیچ نقطه‌ای به مقدار اشباع نرسیده است. عدم همگرایی و اشباع توان همبستگی، نشان‌دهنده عدم وجود آشوب است. همین روال در مقیاس‌های ۵ و ۷ روزه در ایستگاه پل زمانخان نیز برقرار است. به عبارت دیگر، سری زمانی جریان در این ایستگاه‌ها در مقیاس‌های ذکر شده، تصادفی و غیر قابل پیش‌بینی می‌باشد. بر اساس جدول ۲، مشاهده می‌شود که بُعد همبستگی با افزایش مقیاس زمانی بیشتر شده است. دلیل آن، تغییرات دبی جریان و افزایش پارامترهای مؤثر بر جریان است. نتایج حاصل شده با نتایج ریگوندا و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد. همچنین بُعد همبستگی ایستگاه‌های بالادست مخزن سد زاینده‌رود کمتر از ایستگاه‌های پایین‌دست است و هر چه به سمت پایین‌دست رودخانه پیش



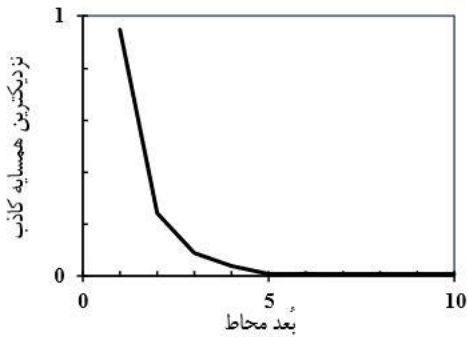
شکل (۲): نمودارهای زمان تأخیر در مقیاس‌های زمانی مختلف برای تمام ایستگاه‌ها.



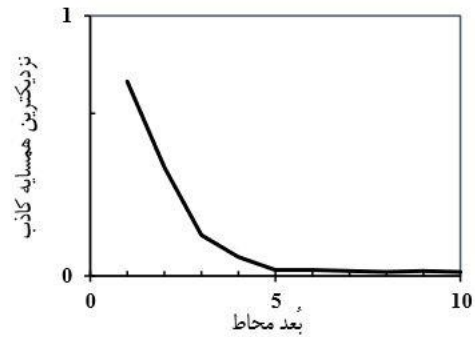
(ب) ایستگاه اسکندری، ۳ روزه



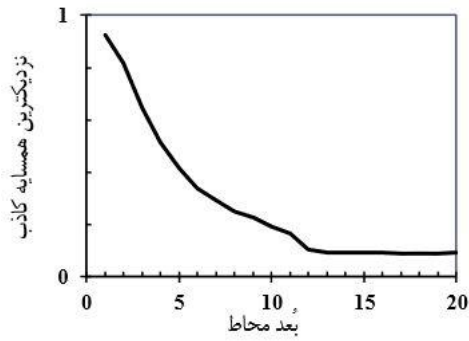
(الف) ایستگاه اسکندری، روزانه



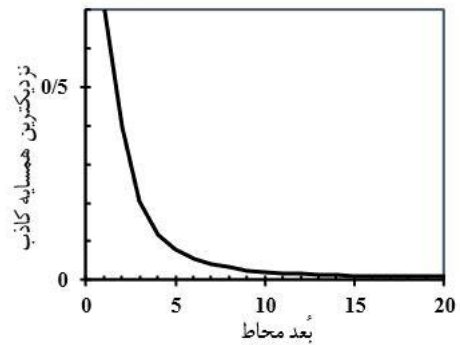
(د) ایستگاه اسکندری، ۷ روزه



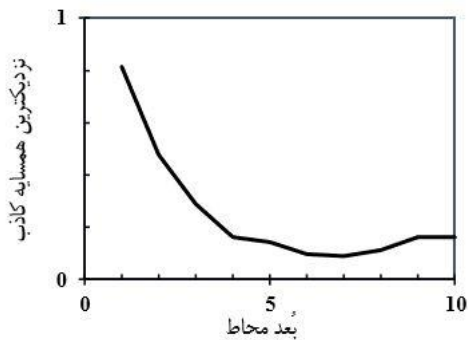
(ج) ایستگاه اسکندری، ۵ روزه



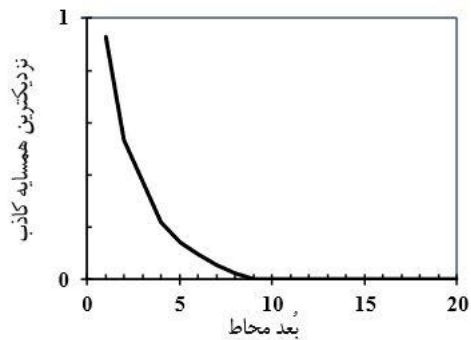
(ب) ایستگاه قلعه شاهرخ، ۳ روزه



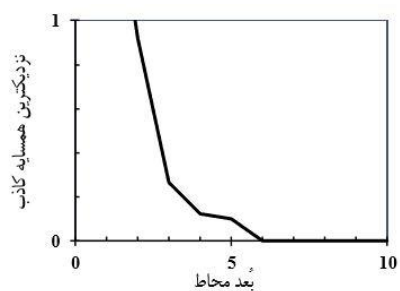
(الف) ایستگاه قلعه شاهرخ، روزانه



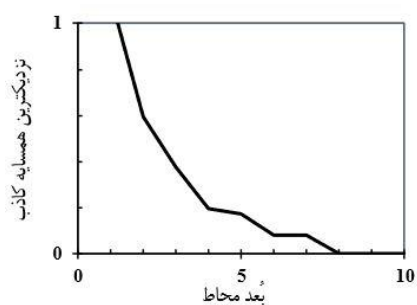
(د) ایستگاه قلعه شاهرخ، ۷ روزه



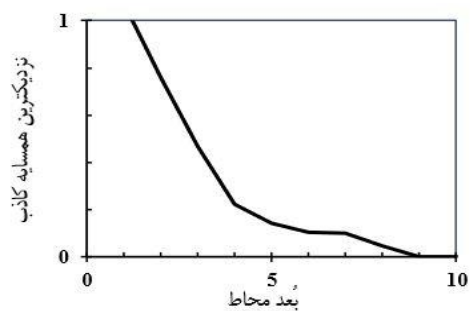
(ج) ایستگاه قلعه شاهرخ، ۵ روزه



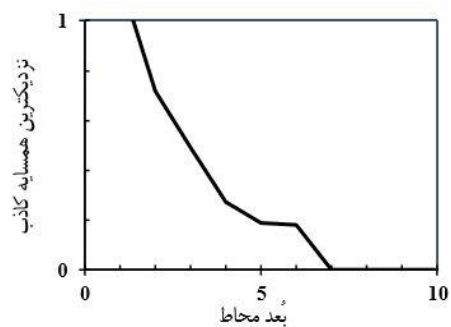
(ب) ایستگاه پل زمانخان، ۳ روزه



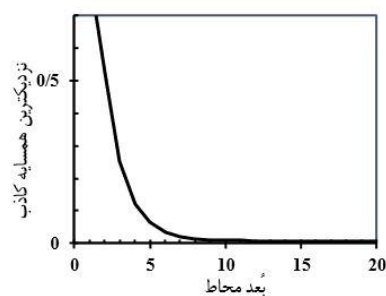
(د) ایستگاه پل زمانخان، ۷ روزه



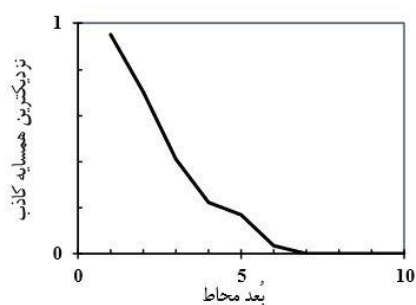
(ب) ایستگاه پل کله، ۳ روزه



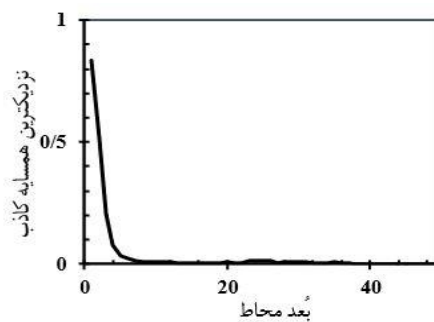
(د) ایستگاه پل کله، ۷ روزه



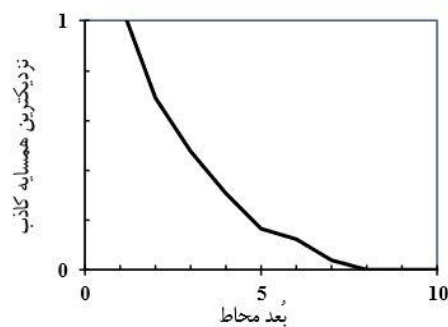
(الف) ایستگاه پل زمانخان، روزانه



(ج) ایستگاه پل زمانخان، ۵ روزه

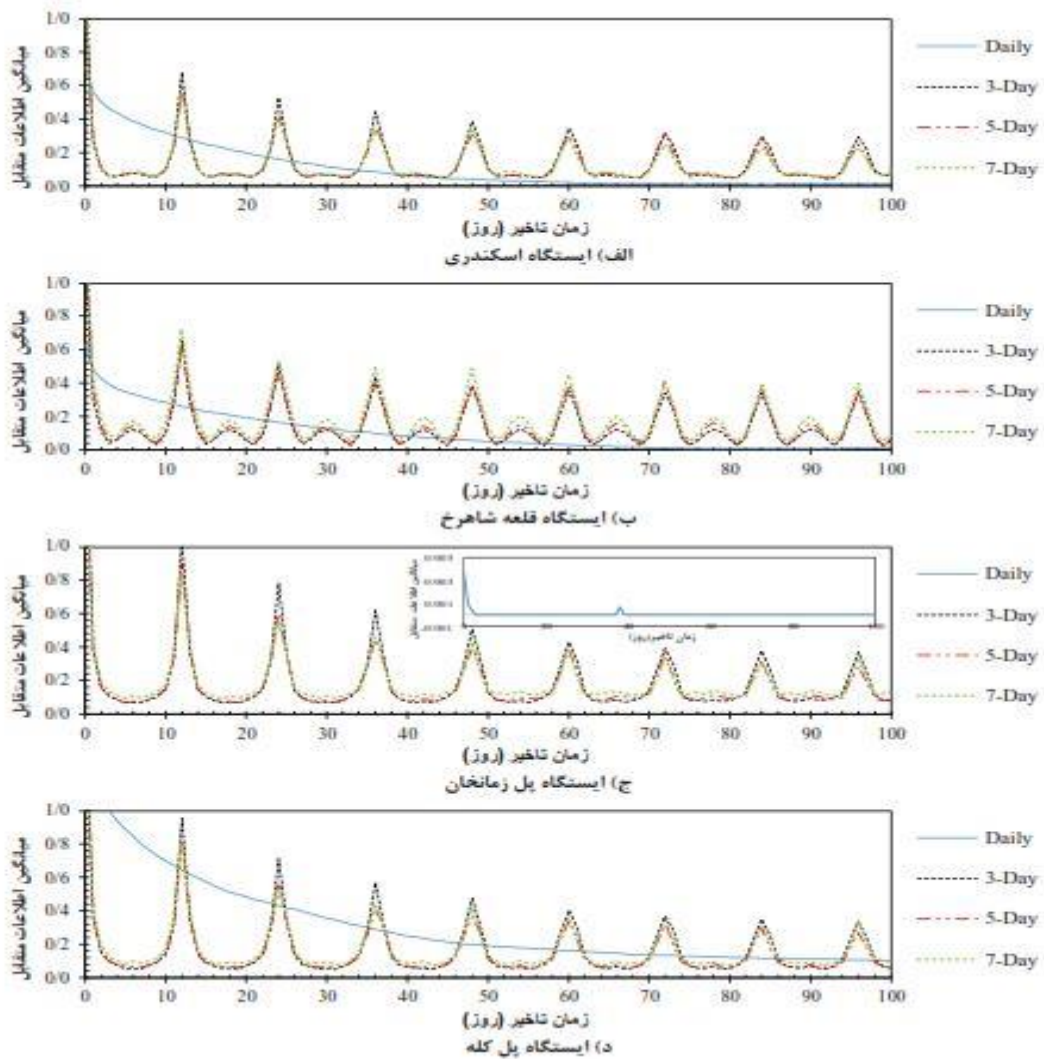


(الف) ایستگاه پل کله، روزانه



(ج) ایستگاه پل کله، ۵ روزه

شکل (۳): نسبت نزدیک ترین همسایگی کاذب برای ابعاد محاط مختلف در مقیاس‌های زمانی متفاوت.



شکل (۴): بُعد همبستگی به ازای ابعاد محاط مختلف برای جریان رودخانه زاینده‌رود در مقیاس‌های زمانی مختلف.

جدول (۲): مقادیر بُعد همبستگی ایستگاه‌های مورد بررسی در مقیاس‌های زمانی مختلف.

Station	Eskandari	Ghale Shahrokh	Pole Zamankhan	Pole Koleh
Daily	3.34	3.60	3.77	3.84
3- Day	3.36	3.90	4.05	4.64
5- Day	3.43	3.93	_____	5.02
7- Day	_____	3.98	_____	5.08

روزه به ترتیب برابر است با: $3/36$ ، $3/9$ ، $4/05$ و $4/64$ ، در مقیاس ۵ روزه در ایستگاه‌های آشوبناک اسکندری، قلعه شاهرخ و پل کله به ترتیب برابر است با: $3/43$ ، $3/93$ و $5/02$

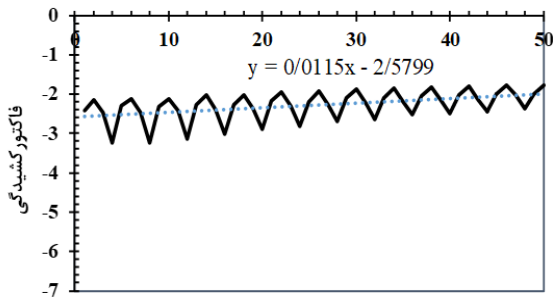
طبق نتایج جدول ۲، بُعد همبستگی ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله در مقیاس روزانه به ترتیب برابر است با: $3/34$ ، $3/6$ ، $3/77$ و $3/84$ ، در مقیاس ۳

برای ایستگاه‌های اسکندری، قلعه‌شاهرخ، پل زمانخان و پل کله در مقیاس روزانه به ترتیب برابر $0/0104$ ، $0/0179$ ، $0/0202$ و $0/0179$ ، در مقیاس ۳ روزه برابر $0/0115$ ، $0/0182$ ، $0/0221$ و $0/0211$ ، در مقیاس ۵ روزه برابر $0/0119$ ، $0/0185$ ، $0/0247$ و $0/0233$ و در مقیاس ۷ روزه برابر $0/0144$ ، $0/0228$ ، $0/0255$ و $0/0249$ به دست آمده است. توان لیاپانوف مثبت محاسبه شده، نشانه حساسیت به شرایط اولیه و رفتار آشوبناک سری زمانی جریان است. اما با توجه به اینکه این نما در تمام مقیاس‌ها مقدار مثبت را نشان می‌دهد، بنابراین این شاخص به تنهایی معیار کافی جهت تشخیص آشوبناکی نیست. نتایج حاصل شده، با دستاوردهای برخی محققین که بیان کرده‌اند نیست (Wolff, 1992; Khatibi et al., 2012) هم‌خوانی دارد.

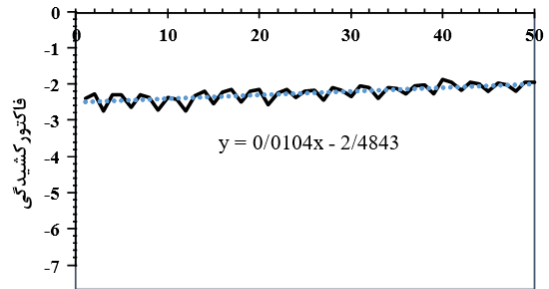
با توجه به رابطه (۱۰)، مقادیر افق پیش‌بینی قابل اعتماد برای سری‌های زمانی جریان در مقیاس روزانه در ایستگاه‌های اسکندری، قلعه‌شاهرخ، پل زمانخان و پل کله (که با توجه به معیار بُعد همبستگی، آشوبناک بودند) به ترتیب در مقیاس روزانه برابر ۹۶، ۵۹، ۴۹ و ۵۶ روز و در مقیاس ۳ روزه برابر ۸۶، ۵۵، ۴۵ و ۴۷ روز می‌باشد. در مقیاس ۵ روزه برای ایستگاه‌های اسکندری، قلعه‌شاهرخ و پل کله به ترتیب برابر ۸۴، ۵۴ و ۴۳ روز و در مقیاس ۷ روزه در ایستگاه‌های قلعه‌شاهرخ و پل کله برابر ۴۴ و ۳۰ روز برآورد شده است.

و در مقیاس ۷ روزه در ایستگاه‌های آشوبناک قلعه‌شاهرخ و پل کله به ترتیب برابر است با: $3/98$ و $5/08$. با توجه به جدول ۲، ایستگاه‌های اسکندری، قلعه‌شاهرخ، و پل زمانخان در تمام مقیاس‌های آشوبناک، با توجه به شاخص‌های نظریه آشوب، دارای آشوب با دامنه کم می‌باشند. اما در ایستگاه پل کله، دبی جریان فقط در مقیاس روزانه دارای آشوبناکی کم بوده و در مقیاس‌های ۳، ۵ و ۷ روزه دارای آشوب با دامنه متوسط است. همچنین، فرایند آشوبناکی در دبی جریان در ایستگاه‌های اسکندری و پل زمانخان به تدریج با افزایش مقیاس زمانی از حالت آشوبی به سمت تصادفی پیش می‌رود. نتایج حاصل با نتایج ادب و همکاران (۱۳۹۴) و شقاقیان و بیدختی (۱۳۸۸) مطابقت دارد. با توجه به اینکه نزدیکترین عدد صحیح بیشتر از بُعد همبستگی، تعداد متغیرهای تأثیرگذار بر رفتار سری زمانی را مشخص می‌کند (Regonda et al., 2004)، در نتیجه، تعداد پارامترهای مؤثر بر جریان در ایستگاه‌های اسکندری و قلعه‌شاهرخ در تمام مقیاس‌ها و در ایستگاه‌های پل زمانخان و پل کله در مقیاس روزانه برابر ۴ می‌باشد. در ایستگاه‌های پل زمانخان و پل کله در مقیاس ۳ روزه برابر ۵ و در مقیاس ۵ روزه و ۷ روزه در ایستگاه پل کله برابر ۶ می‌باشد.

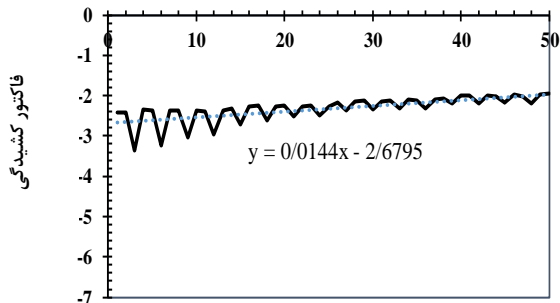
در ادامه، حساسیت به شرایط اولیه و افق پیش‌بینی سیستم مورد مطالعه سنجیده شده است. نمودار بزرگترین نمای لیاپانوف برای تمام ایستگاه‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف در شکل ۵ رسم شده است. با توجه به شیب خط برازش داده شده در این شکل، بزرگ‌ترین توان لیاپانوف



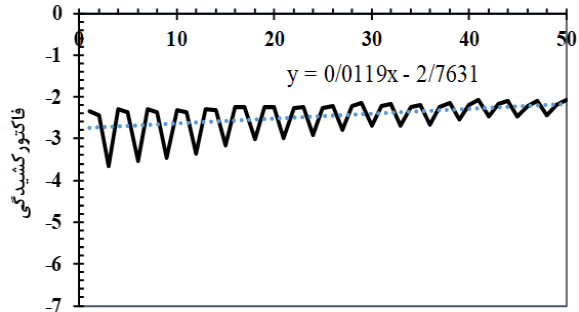
ب) اسکندری ۳ روزه



الف) اسکندری روزانه

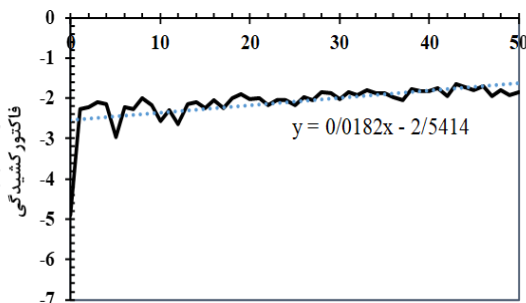


د) اسکندری ۷ روزه



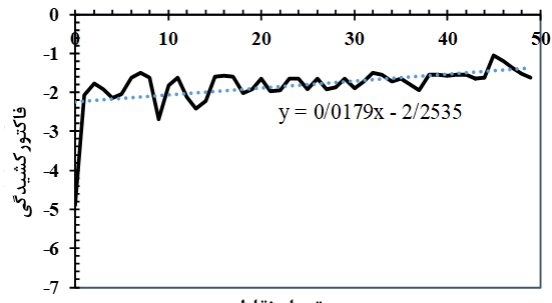
تعداد نقاط

ج) اسکندری ۵ روزه



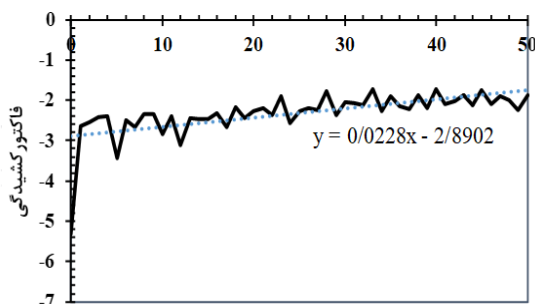
تعداد نقاط

ب) قلعه شاهرخ ۳ روزه



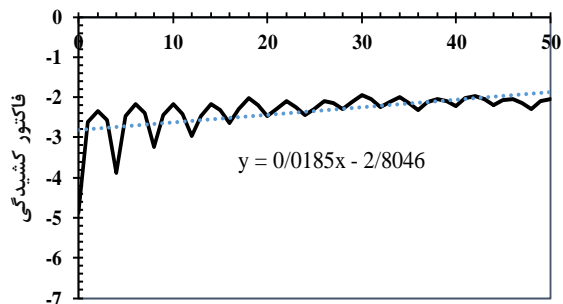
تعداد نقاط

الف) قلعه شاهرخ روزانه



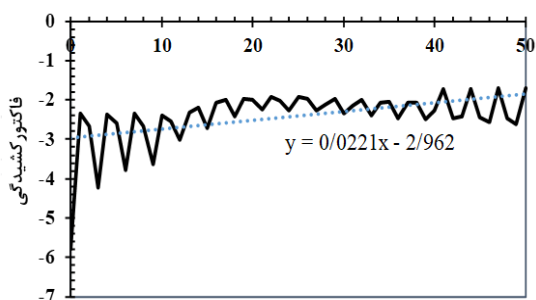
تعداد نقاط

د) قلعه شاهرخ ۷ روزه

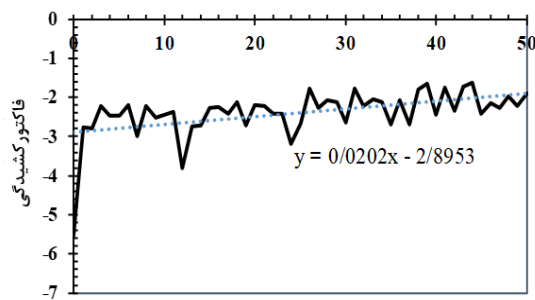


تعداد نقاط

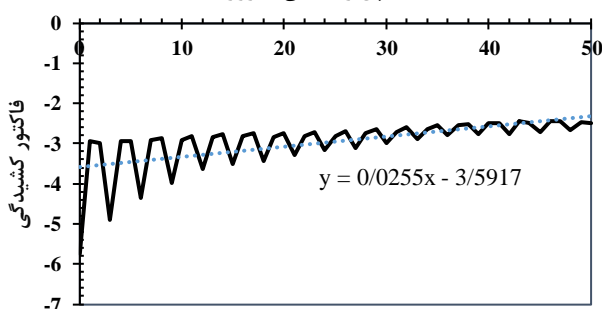
ج) قلعه شاهرخ ۵ روزه



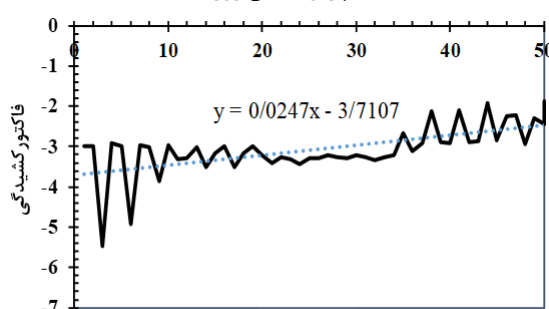
تعداد نقاط
ب) پل زمانخان ۳ روزه



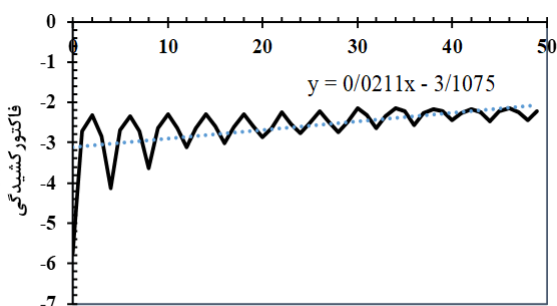
تعداد نقاط
الف) پل زمانخان روزانه



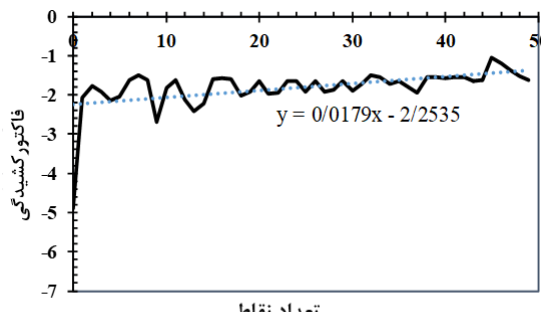
تعداد نقاط
د) پل زمانخان ۷ روزه



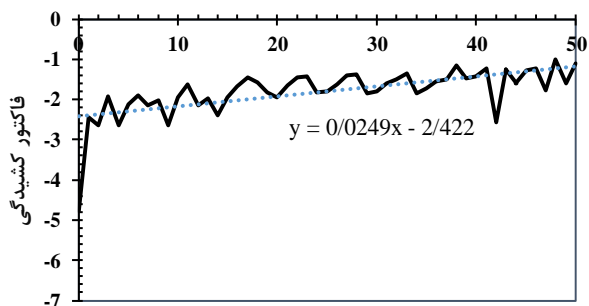
تعداد نقاط
ج) پل زمانخان ۵ روزه



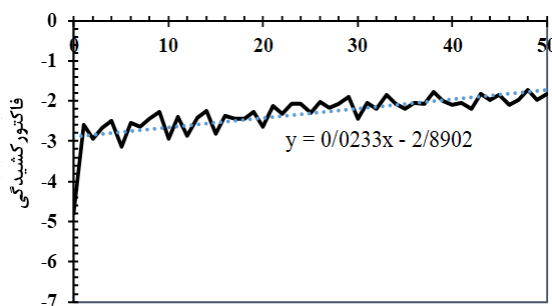
تعداد نقاط
ب) پل کله ۳ روزه



تعداد نقاط



تعداد نقاط



تعداد نقاط

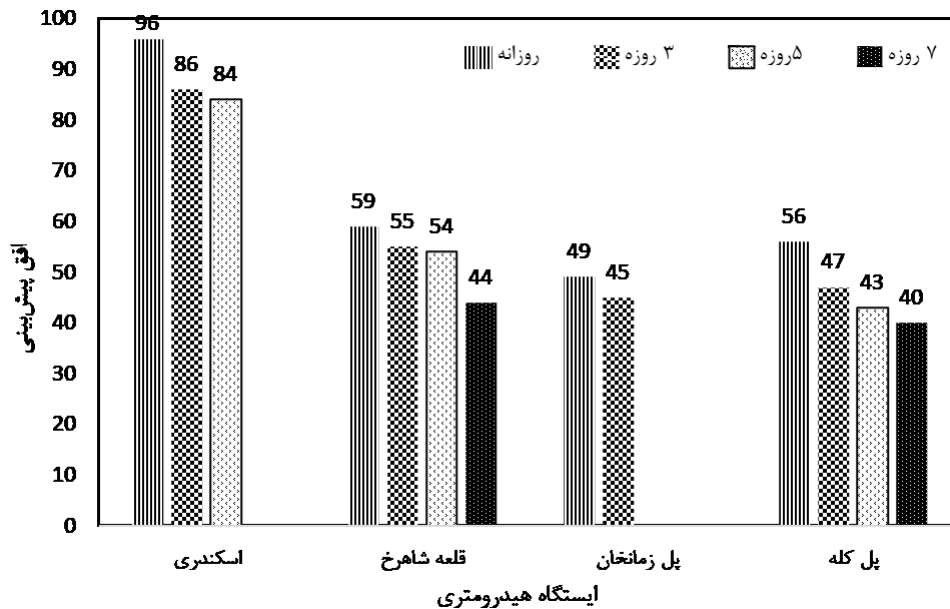
د) پل کله ۷ روزه

ج) پل کله ۵ روزه

شکل (۵):- نمودار بزرگ‌ترین نمای لیپانوف برای ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله در چهار مقیاس زمانی.

توجه به نتایج حاصل، ایستگاه‌های بالادست مخزن سد زاینده‌رود در تمام مقیاس‌ها نسبت به ایستگاه‌های پایین‌دست از افق پیش‌بینی بیشتری برخوردار هستند. علت این امر، تغییرات کمتر دبی جریان در ایستگاه‌های بالادست نسبت به ایستگاه‌های پایین‌دست است. همچنین، افق پیش‌بینی با افزایش مقیاس زمانی کاهش پیدا کرده است. در سری‌های آشوبناک، خطای پیش‌بینی به سرعت رشد می‌کند. به همین سبب، با افزایش مقیاس زمانی، افق پیش‌بینی با کاهش روبه‌رو شده است.

در شکل ۶، تغییرات افق پیش‌بینی در بالادست و پایین‌دست مخزن سد زاینده‌رود در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان داده شده است. افق پیش‌بینی در ایستگاه‌های آشوبناک اسکندری، قلعه شاهرخ، پل زمانخان و پل کله در مقیاس روزانه برابر است با ۹۶، ۵۹، ۴۹ و ۵۶، در مقیاس ۳ روزه به ترتیب برابر است با ۸۶، ۵۵، ۴۵ و ۴۷، در مقیاس ۵ روزه در ایستگاه‌های آشوبناک اسکندری، قلعه شاهرخ و پل کله به ترتیب برابر است با: ۸۴، ۵۴ و ۴۳ و در مقیاس ۷ روزه با توجه به آشوبناک بودن دو ایستگاه قلعه شاهرخ و پل کله به ترتیب برابر با ۴۴ و ۳۰ به‌دست آمده است.



شکل (۶): وند تغییرات افق پیش‌بینی در بالادست و پایین‌دست مخزن سد زاینده‌رود در مقیاس‌های زمانی مختلف.

با توجه به نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان چنین جمع‌بندی کرد:

۱. در ایستگاه اسکندری، بعد همبستگی در مقیاس‌های روزانه، ۳ روزه و ۵ روزه که آشوبناک هستند به ترتیب برابر $۳/۳۴$ ، $۳/۳۶$ و $۳/۴۳$ تخمین زده شد. همچنین در ایستگاه قلعه شاهرخ در مقیاس‌های روزانه، ۳ روزه، ۵ روزه و ۷ روزه به ترتیب برابر $۳/۶۰$ ، $۳/۹۰$ ، $۳/۹۳$ و $۳/۹۸$ و در ایستگاه پل زمانخان در دو مقیاس روزانه و ۳ روزه

نتیجه‌گیری

ارائه راهکارهای نوین جهت برآورد دقیق دبی جریان رودخانه‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف، نقش به‌سزایی در پیشبرد مطالعات مهندسی رودخانه خواهد داشت. برای تعیین مدل مناسب با قابلیت پیش‌بینی دقیق و منطقی، باید ماهیت ساختاری سری زمانی مورد نظر را مورد مطالعه و آزمون قرار داد. در این مطالعه، با به‌کارگیری شاخص‌های آشوبی، رفتار دبی جریان رودخانه زاینده‌رود در مقیاس‌های زمانی روزانه، ۳، ۵ و ۷ روزه بررسی و تحلیل شد.

۵. ایستگاه‌های اسکندری، قلعه شاهرخ و پل زمانخان در تمام مقیاس‌های زمانی آشوبناک، دارای آشوب کم دامنه بودند. اما در ایستگاه پل کله، دبی جریان فقط در مقیاس روزانه دارای آشوبناکی کم بوده و در مقیاس‌های ۳، ۵ و ۷ روزه، آشوب با دامنه متوسط دیده شد.

۶. با توجه به مقادیر محاسبه شده بُعد همبستگی، تعداد پارامترهای مؤثر بر رفتار جریان رودخانه در ایستگاه اسکندری و قلعه شاهرخ در تمام مقیاس‌ها و در ایستگاه پل زمانخان و پل کله در مقیاس روزانه برابر ۴، ایستگاه‌های پل زمانخان و پل کله در مقیاس ۳ روزه برابر ۵ و در مقیاس ۵ روزه و ۷ روزه در ایستگاه پل کله برابر ۶ بود.

۷. بزرگترین نمای لیاپانوف در تمام ایستگاه‌ها دارای مقدار مثبت است و با افزایش مقیاس زمانی، افزایش یافته است.

۸. در تمامی ایستگاه‌ها، مقدار افق پیش‌بینی با افزایش مقیاس زمانی کاهش داشت.

۹. ایستگاه‌های بالادست مخزن سد زاینده‌رود در تمام مقیاس‌ها نسبت به ایستگاه‌های پایین‌دست از افق پیش‌بینی بیشتری برخوردار هستند.

برابر ۳/۷۷ و ۴/۰۵ برآورد گردید. در ایستگاه پل - کله نیز رفتار جریان در تمام مقیاس‌ها آشوبناک است. مقادیر بُعد همبستگی در این ایستگاه در مقیاس‌های زمانی یاد شده به ترتیب برابر ۳/۸۴، ۴/۶۴، ۵/۰۲ و ۵/۰۸ محاسبه شد.

۲. بررسی تأثیر مقیاس زمانی بر مقادیر بُعد همبستگی نشان داد که بُعد همبستگی با افزایش مقیاس زمانی بیشتر شده است.

۳. در مقیاس‌های زمانی روزانه و ۳ روزه، با توجه به بُعد همبستگی کم و نمای لیاپانوف مثبت، رفتار جریان آشوبی و در مقیاس‌های دیگر بعضی ایستگاه‌ها رفتار تصادفی و برخی دیگر رفتار آشوبناک نشان دادند. می‌توان از مدل‌های غیرخطی پویا به منظور پیش‌بینی قابل اعتماد سری زمانی جریان رودخانه در مقیاس‌های آشوبناک بهره برد.

۴. دبی جریان در ایستگاه‌های اسکندری و پل زمانخان، با افزایش مقیاس زمانی از حالت آشوبی به سمت تصادفی پیش رفت. اما در دو ایستگاه قلعه شاهرخ و پل کله، رفتار رودخانه در تمام مقیاس‌های مورد بررسی، آشوبناک بود.

پیشنهادها

با توجه به عملکرد مناسب نظریه آشوب، پیشنهاد می‌گردد که پیش‌بینی جریان رودخانه زاینده‌رود در مقیاس‌های کوتاه‌مدت نیز با نظریه مذکور انجام پذیرد.

منابع

- ادب، ف.، ۱۳۹۵. شبیه‌سازی و تحلیل دبی جریان رودخانه‌های کارون و دز با استفاده از نظریه آشوب. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی منابع آب. دانشکده مهندسی عمران. دانشگاه سمنان.
- ادب، ف.، س. ف. موسوی، س. فرزین، ح. کرمی و س. فهیم فر. ۱۳۹۴. بررسی و تحلیل دبی جریان رودخانه گرگر از دیدگاه نظریه آشوب. سومین کنگره بین‌المللی عمران، معماری و توسعه شهری. دانشگاه شهید بهشتی، تهران.
- اسلامی، ا.، ب. قهرمان، ع. ن. ضیایی و پ. اسلامی. ۱۳۹۵. تأثیر کاهش نوفه در تحلیل پویایی غیرخطی سری زمانی دمای حداکثر روزانه در ایستگاه کرمان. تحقیقات منابع آب ایران. ۱۷۱-۱۸۵.
- امیرخان، م.، ح. دیده‌خانی و ا. م. زاهدی انارکی. ۱۳۹۴. پیش‌بینی سری زمانی با استفاده از مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی و الگوریتم بهینه‌سازی گروهی ذرات. پژوهش و فناوری. ۱۶۷-۱۴۹.

پری زنگنه، م.، م. عطائی و پ. معلم. ۱۳۸۷. تخمین بُعد محاط سری‌های زمانی حاصل از سیستم‌های آشوبی با بُعد بالا توسط شبکه‌های عصبی تأخیر زمانی توسعه یافته. دومین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و هوشمند ایران، تهران، دانشگاه صنعتی مالک اشتر.

پوستی زاده، ن.، و ن. نجفی. ۱۳۹۰. مقایسه کاربرد شبکه عصبی مصنوعی (ANN) با سیستم استنتاج فازی (FIS) در پیش‌بینی جریان رودخانه زاینده رود. تحقیقات منابع آب ایران. ۹۲-۹۷.

جباری قره باغ، ث.، ح. رضایی و ب. محمدنژاد. ۱۳۹۴. مقایسه‌ی فضای حالت بازسازی شده و آشوبناکی جریان رودخانه‌ی نازلوچای در مقیاس‌های زمانی مختلف. مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک. ۱۵۵-۱۳۵.

شقایبان، م. ر.، و ط. بیدختی. ۱۳۸۸. بررسی وجود آشوب در جریان رود در مقیاس‌های زمانی گوناگون. فصلنامه مهندسی منابع آب. ۸-۱.

لطف‌اللهی یقین، م. ع.، ا. لشته‌نشایی، م. ع. قربانی و م. بیک لریان. ۱۳۹۲. مدل‌سازی و پیش‌بینی ارتفاع موج شاخص دریای خزر با نظریه آشوب. نشریه مهندسی عمران و محیط زیست. ۱۰۵-۹۷.

مرادی‌زاده کرمانی، ف. ۱۳۸۹. تخمین جریان رودخانه‌ها با استفاده از نظریه آشوب و برنامه‌ریزی ژنتیک در مقیاس‌های زمانی مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی آب. دانشکده کشاورزی. دانشگاه تبریز.

Abarbanel H. 1996. Analysis of observed chaotic data. Springer-Verlag, New York.

Fraser, A. and H.L. Swinney. 1986. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. Phys. Rev. 33:1134-1140.

Grassberger, P. and I. Procaccia. 1983. Measuring the strangeness of strange attractors. Physica D. 9:189-208.

Hassanzadeh, Y., M. Lotfollahi-Yaghin, S. Shahverdi, S. Farzin and N. Farzin. 2013. De-noising and prediction of time series based on the wavelet algorithm and chaos theory (Case study: SPI drought monitoring index of Tabriz city). Iran Water Resour. Res. 8(3):1-13.

Hu, Z., C. Zhang, G. Luo, Z. Teng and C. Jia. 2013. Characterizing cross-scale chaotic behaviors of the runoff time series in an inland river of Central Asia. Quaternary Int. 311:132-139.

Islam, M.N. and B. Sivakumar. 2002. Characterization and prediction of runoff dynamics: A nonlinear dynamical view. Adv. Water Resour. 25:179-190.

Khatibi, R., B. Sivakumar, M.A. Ghorbani, O. Kisi, K. Koçak and D.F. Zadeh. 2012. Investigating chaos in river stage and discharge time series. J. Hydrol. 414:108-117.

Koutsoyiannis, D. 2006. On the quest for chaotic attractors in hydrological processes. Hydrol. Sci. J. 51(6):1065-1091.

Ng, W.W., U.S. Panu and W.C. Lennox. 2007. Chaos based analytical techniques for daily extreme hydrological observations. J. Hydrol. 342:17-41.

Regonda, S.K., B. Sivakumar and A. Jain. 2004. Temporal scaling in river flow: Can it be chaotic? Hydrol. Sci. J. 49(3):373-385.

Rosenstein, M.T., J.J. Collins and C.J. De Luca. 1993. A practical method for calculating largest Lyapunov exponents from small data sets. Physica D: Nonlinear Phenomena. 65(1-2):117-134.

Sivakumar, B. 2009. Nonlinear dynamics and chaos in hydrologic systems: Latest developments and a look forward. Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 23(7):1027-1036.

Valipour, M. 2015. Long-term runoff study using SARIMA and ARIMA models in the United States. Meteorol. Appl. 22(3):592-598.

Wang, W., J.K. Vrijling, P.H.A.J.M. Van Gelder and J. Ma. 2006. Testing for nonlinearity of streamflow processes at different timescales. J. Hydrol. 322(1):247-268.



Wang, J., J. Hu, K. Ma and Y. Zhang. 2015. A self-adaptive hybrid approach for wind speed forecasting. *Renewable Energy* 78:374-85.

Wolff, R.C.L. 1992. Local Lyapunov exponents: Looking closely at chaos. *J. Royal Stat. Soc.* 54(2):353-371.



Relationship between chaos theory indicators in monitoring of river flow at short-term time scales

Mahsa Boustani^۱, Hojat Karami^{۲*}, Sayed Farhad Mousavi^۳, Saeed Farzin^۴

Abstract

This study was carried out to study and analyze the effect of time-scale changes on chaotic range of discharge of upstream and downstream stations of Zayandehrud Dam Reservoir, trend of changes in the correlation coefficient of flow and forecast horizon for 43 years (1971-2013). Also, the relationship between correlation dimension and forecast horizon is determined over time. For this purpose, discharge of hydrometric stations of Eskandari, Ghale Shahrokh, Pole Zamankhan and Pole Kaleh have been used in four daily, 3, 5, and 7-day time scales. As a first step, the time delay and embedding dimension of the system are calculated using the method of average mutual information and the nearest false neighbors. Then, fractal dimension of the system is estimated using the correlation dimension method. Then, using the Lyapunov's exponent, the prediction horizon is estimated in the chaotic series. Results revealed that flow rate at a 5-day scale has a random behavior at Pole Zamankhan station and at a 7-day scale at the Pole Zamankhan and Eskandari stations and is chaotic in other time scales. Eskandari, Ghale Shahrokh and Pole Zamankhan stations have low chaos at all chaotic scales. At Pole Kaleh station, the flow rate is low in chaos at daily scale and has average chaotic domain at 3, 5 and 7-day scales. According to the other results, by increasing the time scale, the correlation dimension increases and the forecast horizon decreases. On the other hand, according to the Lyapunov exponent, the upstream stations of Zayandehrud Dam Reservoir have more prediction horizon than downstream stations in all time scales.

Keywords: Flow Monitoring, Chaos Theory, Time Scale, Chaotic Domain, Prediction Horizon.

¹ Master of Science, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
mahsaboustani@semnan.ac.ir

^{2*} Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
Corresponding Author Email: hkarami@semnan.ac.ir

³ Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
fmousavi@semnan.ac.ir

⁴ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
saeed.farzin@semnan.ac.ir